

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИОННОГО  
РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ  
И ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА**

**В. Г. Матвейкин<sup>1</sup>, А. А. Ишин<sup>2</sup>, С. А. Скворцов<sup>1</sup>, С. И. Дворецкий<sup>3</sup>**

*Кафедры: «Информационные процессы и управление» (1),  
«Технологии и оборудование пищевых и химических производств» (3),  
ФГБОУ ВО «ТГТУ» г. Тамбов, Россия; sdvoretzky@tstu.ru;  
ООО «Энерготехпроект» (2), г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** водород; динамика; изотерма адсорбции; кинетика; короткоцикловая безнагревная адсорбция; математическая модель; многокомпонентная газовая смесь; оптимизация; управление; цеолитовый адсорбент.

**Аннотация:** Сформулирована задача оптимизации режимных переменных (давления на стадии адсорбции и времени цикла адсорбции) и разработана двухуровневая система адаптивной оптимизации процесса адсорбционного разделения газовых смесей и получения водорода максимальной чистоты в четырех-адсорберной установке короткоцикловой безнагревной адсорбции с гранулированным цеолитовым адсорбентом СаА. Проведено численное исследование эффективности функционирования системы адаптивного управления при ступенчатом изменении возмущающих воздействий (концентрации диоксида углерода, температуры и давления газовой смеси) в питании установки короткоцикловой безнагревной адсорбции.

---

**Введение**

Циклические адсорбционные процессы широко применяют в промышленности для разделения углеводородов, концентрирования водорода, кислорода, диоксида углерода и др. газов, безнагревной осушки газов, извлечения метана и т.п. Одной из актуальных задач в области адсорбционного разделения является получение водорода из водородсодержащих технологических потоков (газы конверсии и окисления углеводородов, нефтезаводские газы, синтез-газ и др.) [1]. Типичными веществами, сопутствующими водороду, являются азот, оксид и диоксид углерода, метан. Целью данной работы является анализ циклического процесса адсорбционного обогащения газовой смеси водородом как объекта управления и разработка системы автоматического управления данным процессом, обеспечивающей поддержание максимальной концентрации продукционного водорода при выполнении регламентных технологических условий (ограничений).

## Анализ процесса получения водорода методом адсорбционного разделения газовых смесей как объекта управления

Анализ процесса короткоциклового безнагревной адсорбции (КБА) обогащения газовой смеси водородом как объекта исследования позволил определить [2, 3]:

– входные переменные  $\mathbf{x}$  (возмущающие воздействия) установки КБА (состав  $\mathbf{y}^{in} = (y_1^{in}, y_2^{in}, y_3^{in})$ , температуру  $T_g^{in}$ , расход  $G^{in}$  и давление  $P^{in}$  газовой смеси в питании установки, давления на продукционном  $P_{H_2}^{out}$  и на сбросном  $P_{CO_2}^{out}$  выходах установки КБА), то есть  $\mathbf{x} = \{y^{in}, T_g^{in}, G^{in}, P^{in}, P_{H_2}^{out}, P_{CO_2}^{out}\}$  (рис. 1);

– режимные (управляющие) переменные  $\mathbf{u}$  (давление  $P_{ads}$  и время цикла адсорбции  $\tau_{ads}$ ), то есть  $\mathbf{u} = \{P_{ads}, \tau_{ads}\}$  (рис. 1);

– выходные переменные  $\mathbf{y}$  установки КБА (состав  $\mathbf{y}^{out} = (y_1^{out}, y_2^{out}, y_3^{out})$ , расходы  $G^{out}$ ,  $G^p$  и температуру  $T_g^{out}$  газовой смеси на выходе из установки КБА, производительность установки  $Q = y_1^{out} \cdot G^p$ , где  $G^p = G^{out} - G^{des}$ ,  $G^{des}$  – объемный расход потока, обогащенного водородом, направляемого на регенерацию адсорбента), то есть  $\mathbf{y} = \{y^{out}, G^{out}, G^p, T_g^{out}, Q\}$  (рис. 1).

При математическом описании процесса обогащения газовой смеси водородом в установке КБА принимали следующие допущения [2, 4]: 1) исходная газовая смесь является трехкомпонентной (содержит  $H_2$  с концентрацией  $(65 \pm 2)$  % об. (в формулах используется индекс «1»),  $CO_2$  с концентрацией  $(34 \pm 2)$  % об. (индекс «2»),  $CO$  с концентрацией  $(1 \pm 0,5)$  % об. (индекс «3»)) и рассматривается как идеальный газ, что вполне допустимо при давлении в адсорбере до  $200 \times 10^5$  Па; 2) в качестве адсорбента используется гранулированный цеолит СаА с диаметром гранул 1,5 мм, коэффициентом пористости гранул  $\sim 0,394$  и диаметром транспортных пор  $d \leq 0,5 \times 10^{-3}$  м; 3) геометрические размеры адсорбционного слоя считаем постоянными в течение заданного срока эксплуатации  $\sim 10^5$  ч; 4) слой адсорбента представляет собой сплошную среду с коэффициентом порозности  $\epsilon$ ; 5) десорбционная ветвь изотерм сорбции  $H_2$ ,  $CO_2$  и  $CO$  на гранулированном цеолите СаА совпадает с адсорбционной и носит нелинейный характер. В соответст-



**Рис. 1. Схема четырехадсорберной установки КБА как объекта управления при обогащении газовой смеси водородом**

ввии с принятыми допущениями математическое описание процесса концентрирования водорода в потоке газовой смеси включает уравнения покомпонентного материального и теплового балансов в потоке газовой смеси по высоте слоя адсорбента (параболические дифференциальные уравнения второго порядка); уравнение массопереноса адсорбтива ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ) из газовой фазы в твердую фазу адсорбента (через границу раздела фаз); уравнение изотермы сорбции Ленгмюра–Фрейндлиха для расчета равновесной концентрации адсорбтива на внешней поверхности гранул адсорбента; уравнение Эргуна, связывающее изменение давления и скорости газовой смеси по высоте адсорбента; начальные и граничные условия для системы параболических дифференциальных уравнений второго порядка [2].

### Постановка задачи оптимизации установившегося технологического режима

Задача оптимизации технологического процесса получения водорода по технологии КБА может быть сформулирована следующим образом: при заданных диапазонах изменения возмущающих воздействий

$$\mathbf{x} = \{y^{in}, T_g^{in}, G^{in}, P^{in}, P_{H_2}^{out}, P_{CO_2}^{out}\}$$

требуется найти вектор оптимальных управляющих воздействий  $\mathbf{u}^* = (P_{ads}, \tau_{ads})$ , при котором целевая функция (среднее значение концентрации  $y_1^{out}$  продукционного водорода на заданном периоде  $[0, t_{pr}]$  функционирования установки КБА) достигает экстремального значения, то есть

$$I(\mathbf{u}^*) = \left( \frac{1}{t_{pr}} \int_0^{t_{pr}} y_1^{out}(\mathbf{u}^*) dt \right) = \max_{\mathbf{u}=\{P_{ads}, \tau_{ads}\}} \left( \frac{1}{t_{pr}} \int_0^{t_{pr}} y_1^{out}(\mathbf{u}) dt \right), \quad (1)$$

выполняются связи в форме уравнений математической модели [2, 3] и ограничения:

– по концентрации продукционного водорода  $y_1^{out}$

$$\underline{y_1^{out}} - y_1^{out} \leq 0, \quad (2)$$

– производительности  $Q_{H_2}$  установки КБА

$$\underline{Q} \leq Q \leq \overline{Q}, \quad (3)$$

– расходу газовой смеси  $G^{in}$  в питании установки КБА

$$\underline{G^{in}} \leq G^{in} \leq \overline{G^{in}}, \quad (4)$$

– давлению на стадии адсорбции  $P_{ads}$

$$P^{in} \leq P_{ads}, \quad (5)$$

где черта внизу (вверху) – нижние (верхние) предельно допустимые значения технологических переменных.

Сформулированная задача (1)–(5) относится к классу задач нелинейного программирования, для ее решения будем использовать методы штрафных функций и последовательного квадратичного программирования [5].

## Автоматизация процесса получения водорода методом адсорбционного разделения газовых смесей

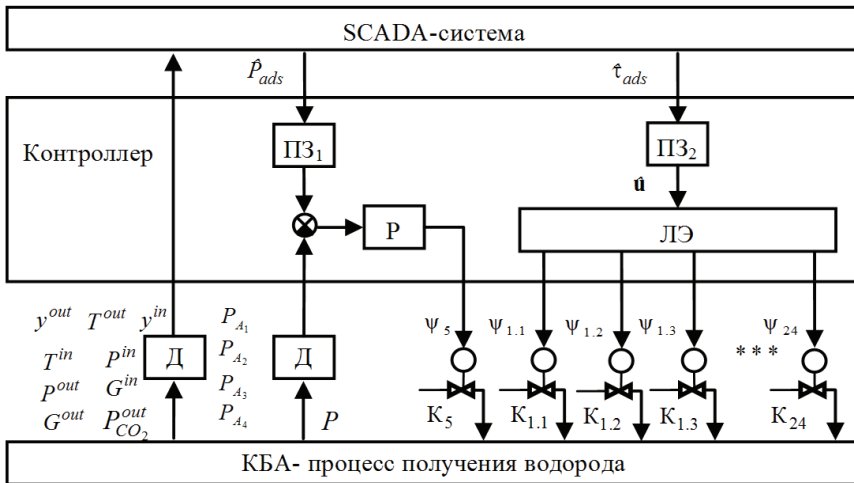
Для оперативного решения задачи оптимизации (1) – (5) и управления процессом получения водорода разработана двухуровневая система адаптивной оптимизации и управления.

Технологические переменные установки адсорбционного получения водорода подвержены случайным изменениям в ходе процесса адсорбции. Значения возмущений, которые представлены нерегулируемыми переменными исходной газовой смеси в питании установки КБА, в ходе процесса также меняются случайным образом. В этом случае необходимо поддерживать априори неизвестное максимальное значение заданной целевой функции оптимизации, что обуславливает применение системы адаптивной оптимизации и управления с изменяемыми заданиями автоматическим регуляторам, работающей по принципу управления по возмущению с эталонной моделью технологического процесса в контуре управления [6, 7].

В системе адаптивной оптимизации и управления осуществляется непрерывный контроль за текущими значениями возмущающих воздействий и при их отклонении от номинальных значений на верхнем уровне с помощью персонального компьютера оперативно решается задача оптимизации (1) – (5) и определяются текущие оптимальные задания  $\hat{\mathbf{u}} = (\hat{P}_{ads}, \hat{\tau}_{ads})$  регуляторам автоматической системы регулирования технологического процесса получения водорода, функционирующей на нижнем уровне.

На основании полученного значения  $\hat{\tau}_{ads}$  пересчитывается циклограмма  $\hat{U}$  работы клапанов и с помощью программного задатчика ПЗ<sub>2</sub> и логического элемента ЛЭ осуществляется ее реализация в установке КБА. Текущее оптимальное значение  $\hat{P}_{ads}$  поступает в качестве задания ПИД-регулятору одноконтурной системы автоматического регулирования с обратной связью (рис. 2).

Таким образом, система адаптивной оптимизации и управления режимами функционирования установки КБА обеспечивает выполнение следующих функций:  
– поиск и поддержание оптимального значения чистоты получаемого водорода  $y_1^{out}$ ;

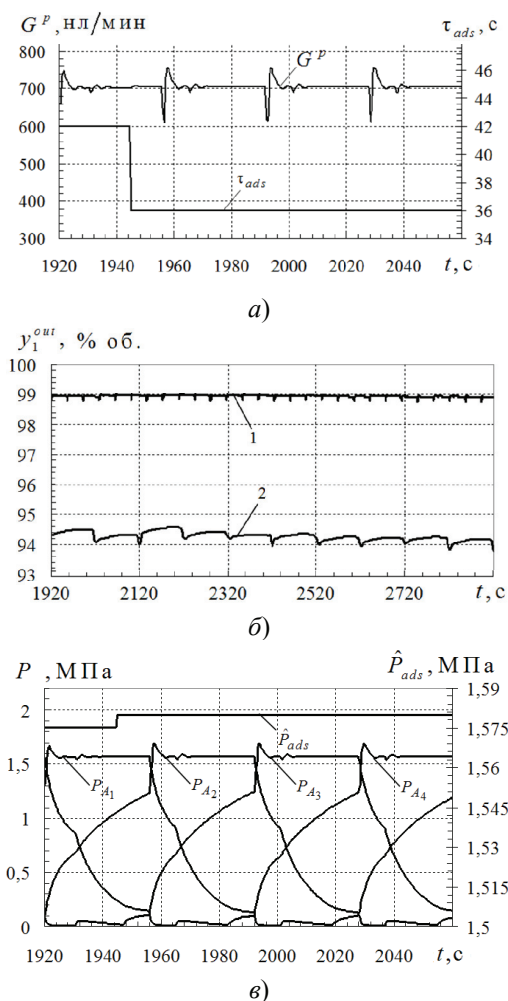


**Рис. 2. Структурная схема системы управления:**  
 $\psi$  – степень открытия клапана; Д – датчик; Р – регулятор;  
 ЛЭ – логический элемент; ПЗ – программный задатчик

- расчет текущего оптимального времени цикла адсорбции  $\hat{\tau}_{ads}$ ;
- расчет и реализация оптимальной циклограммы работы клапанов в установке КБА для получения водорода;
- расчет текущего оптимального давления на стадии адсорбции  $\hat{P}_{ads}$ ;
- расчет и формирование управляющих воздействий на приводы клапанов.

### Имитационное исследование системы управления

На рисунке 3 представлены результаты имитационных исследований функционирования системы управления при ступенчатом повышении температуры  $T_g^{in}$  исходной смеси от 30 до 50 °С.

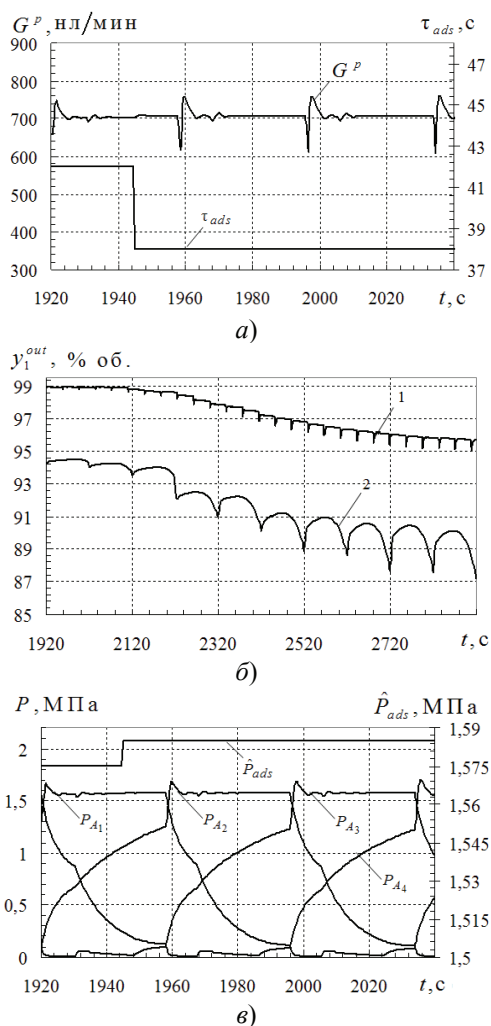


**Рис. 3. Переходные процессы в системе управления при ступенчатом повышении температуры исходной смеси:**

- a* – изменение расхода  $G^P$  продукционного водорода и оптимального времени цикла адсорбции  $\hat{\tau}_{ads}$  в зависимости от времени  $t$ ;
- б* – изменение концентрации  $y_1^{out}$  продукционного водорода в зависимости от времени при наличии 1 и отсутствии 2 адаптивной оптимизации;
- в* – изменение давлений в адсорберах  $A_1 - A_4$  установки

Анализ показывает, что система управления компенсирует ступенчатое возмущение уменьшением длительности  $\tau_{ads}$  стадии адсорбции с 42 до 36 с (рис. 3, а). При этом система управления обеспечивает поддержание концентрации продукционного водорода на уровне  $\sim 99\%$  об. и расхода  $G^P$  продукционного водорода на минимально допустимом уровне (рис. 3, а), в то время как в установке КБА без адаптивной оптимизации концентрация продукционного водорода устанавливается на уровне  $\sim 94\%$  об. (рис. 3, б).

На рисунке 4 представлены результаты имитационных исследований функционирования системы управления при ступенчатом повышении содержания  $\text{CO}_2$  в исходной смеси  $y_2^{in}$  от 34 до 45 % об. В данном случае система управления



**Рис. 4. Переходные процессы в системе управления при ступенчатом повышении содержания  $\text{CO}_2$  в исходной смеси:**

- а – изменение расхода  $G^P$  продукционного водорода и оптимального времени цикла адсорбции  $\hat{\tau}_{ads}$  в зависимости от времени;
- б – изменение концентрации  $y_1^{out}$  продукционного водорода в зависимости от времени при наличии 1 и отсутствии 2 адаптивной оптимизации;
- в – изменение давлений в адсорберах  $A_1$ – $A_4$  установки

Таблица 1

## Результаты сравнительного анализа работы установки КБА

Возмущающее воздействие – ступенчатое увеличение	$I^*$ , % об.	$I$ , % об.	$\Delta I$ , % об.
$T_g^{in}$ от 30 до 50 °С	98,92	94,13	4,79
$y_2^{in}$ от 34 до 45 % об.	95,76	89,46	6,3
$P_{H_2}^{out}$ до 0,3 МПа	98,92	95,09	3,83
$P_{CO_2}^{out}$ до 0,1 МПа	96,51	90,22	6,29

Примечание:  $I^*$ ,  $I$  – значения целевой функции при наличии и без адаптивной оптимизации в системе управления соответственно;  $\Delta I$  – изменение целевой функции.

минимизирует снижение чистоты продукционного водорода, обеспечивая поддержание концентрации продукта на максимально возможном уровне для изменившихся характеристик исходной смеси. Система управления с адаптивной оптимизацией более эффективна по сравнению с системой без адаптивной оптимизации (рис. 4, б).

Результаты сравнительного анализа работы установки КБА при наличии и отсутствии адаптивной оптимизации в системе управления представлены в табл. 1.

### Заключение

Математическое, информационное и алгоритмическое обеспечение двухуровневой системы адаптивной оптимизации и управления статическими режимами функционирования установки КБА могут быть использованы при проектировании новых автоматизированных процессов и адсорбционных технологических установок с циклически изменяющимся давлением для разделения и очистки многокомпонентных газовых смесей.

*Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания № 10.3533.2017/ПЧ.*

### Список литературы

1. Ruthven, D. M. Pressure Swing Adsorption / D. M. Ruthven, S. Farooq, K. S. Knabel. – New York : VCH Publishers, 1994. – 352 p.
2. Mathematical Modeling of Hydrogen Production Process by Pressure Swing Adsorption Method / E.I. Akulinin [et al.] // Advanced Materials and Technologies. – 2017. – No. 2. – P. 38 – 49. doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.038-049
3. Ишин, А. А. Математическое моделирование и управление процессом получения водорода методом адсорбционного разделения газовой смеси : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Ишин Андрей Анатольевич. – Тамбов, 2017. – 152 с.
4. Akulinin, E. Modeling and Automation of Adsorption Processes with Cyclically Changing Pressure During the Separation of Gas Mixture / E. Akulinin, A. Ishin, S. Skvortsov // 17<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017 : Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 17 : Energy and Clean Technologies, Issue 41. – P. 527 – 534.

5. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике : в 2-х кн. : пер. в англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М. : Мир, 1986. – 2 кн.

6. Симонов, М. С. Исследование динамических режимов пневматического концентратора кислорода / М. С. Симонов, С. А. Скворцов, М. М. Шлыков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, вып. 4. – С. 987 – 990.

7. Васильев, А. С. Исследование режимов концентраторов кислорода с учетом их конструктивных особенностей / А. С. Васильев, Т. А. Лапина, С. А. Скворцов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, вып. 4. – С. 1007 – 1011.

---

## Automation of the Process of Gas Mixtures Adsorptive Separation and Hydrogen Production

V. G. Matveykin<sup>1</sup>, A. A. Ishin<sup>2</sup>, S. A. Skvortsov<sup>1</sup>, S. I. Dvoretzky<sup>3</sup>

*Department of Information Processes and Control (1),  
Department of Technology and Equipment for Food and Chemical Production (3),  
TSTU, Tambov, Russia; sdvoretzky@tstu.ru;  
LLC “Energotehproekt” (2), Tambov, Russia*

**Keywords:** adsorption isotherm; control; dynamics; hydrogen; kinetics; mathematical model; multicomponent gas mixture; optimization; short-cycle heatless adsorption; zeolite adsorbent.

**Abstract:** The problem of optimizing the regime variables (adsorption stage pressure and the adsorption cycle time) is formulated and the 2-level system for adaptive optimization of the process of gas mixtures adsorptive separation and hydrogen production with maximum purity in the 4-bed short-cycle heatless adsorption unit with a granular zeolite adsorbent CaA is developed. A numerical study of the efficiency of the adaptive control system with a step change of disturbances (carbon dioxide concentration, temperature and pressure of the gas mixture) on input of the short-cycle heatless adsorption unit was carried out.

### References

1. Ruthven D.M., Farooq S., Knaebel K.S. *Pressure swing adsorption*, New York: VCH Publishers, 1994, 352 p.

2. Akulinin E.I., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I. Mathematical Modeling of Hydrogen Production Process by Pressure Swing Adsorption Method, *Advanced Materials and Technologies*, 2017, no. 2, pp. 38-49, doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.038-049

3. Ishin A.A. *Matematicheskoye modelirovaniye i upravleniye protsessom polucheniya vodoroda metodom adsorbtsionnogo razdeleniya gazovoy smesi* [Mathematical modeling and control of the hydrogen production process by the adsorptive separation method for gas mixtures], PhD Dissertation (Engineering), Tambov, 2017, 152 p. (In Russ.)

4. Akulinin, E., Ishin, A., Skvortsov, S. Modeling and Automation of Adsorption Processes with Cyclically Changing Pressure During the Separation of Gas Mixture, *17<sup>th</sup> International Multiisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017*, Conference Proceedings, 2017, vol. 17, Energy and Clean Technologies, issue 41, pp. 527-534.

5. Reklaitis G.V., Ravindran A., Ragsdell K.M. *Engineering Optimization: Methods and Applications*, New York: Wiley, 1983, 684 p.



6. Simonov M.S., Skvortsov S.A., Shlykov M.M. *Issledovaniye dinamicheskikh rejimov pnevmaticheskogo koncentratora kisloroda* [Study of dynamic modes of the pneumatic oxygen concentrator], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, issue 4, p. 987-990. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Vasilyev A.S., Lapina T.A., Skvortsov S.A. [The study of the modes of oxygen concentrators and their structural features], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, issue 4, p. 1007-1011. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Automatisierung des Prozesses der Adsorptionstrennung von Gasgemischungen und der Wasserstoffherzeugung**

**Zusammenfassung:** Es ist das Problem der Optimierung von Betriebsvariablen (Druck in der Adsorptionsstufe und Zeit des Adsorptionszyklus) formuliert und das 2-stufige System zur adaptiven Optimierung des Verfahrens der Adsorptionstrennung von Gasgemischen und Erzeugung von Wasserstoff höchster Reinheit in der 4-Adsorberanlage für kurzzyklische, nicht beheizte Adsorption mit körnigem Zeolith-Adsorptionsmittel CaA ist entwickelt.

Eine numerische Untersuchung der Effektivität der Funktionsweise des adaptiven Regelsystems mit einer schrittweisen Änderung der Störeffekte (Konzentration von Kohlendioxid, Temperatur und Druck des Gasgemisches) bei der Versorgung einer kurzzyklischen nicht erwärmten Adsorptionsanlage ist durchgeführt.

---

### **Automatisation du processus de la séparation d'adsorption des mélanges gazeux et de la production de l'hydrogène**

**Résumé:** Est formulée la tâche de l'optimisation des variables de régime (pression de la phase d'adsorption et temps du cycle de l'adsorption); est conçu un système à 2 niveaux de l'optimisation d'adaptation du processus de la séparation d'adsorption des mélanges gazeux et de l'obtention de l'hydrogène de la pureté maximale dans une installation de 4 adsorptions à cycle court sans chauffage avec un adsorbant granulé zéolithique CaA. Est effectuée une étude numérique de l'efficacité du fonctionnement du système de la commande adaptative lors de la modification étagée des effets perturbateurs (concentration en dioxyde de carbone, température et pression du mélange gazeux) dans l'alimentation de l'installation d'adsorption à cycle court sans chauffage.

---

**Авторы:** *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Ишин Андрей Анатольевич* – кандидат технических наук, инженер-проектировщик, ООО «Энерготехпроект», г. Тамбов, Россия; *Скворцов Сергей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление»; *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, проректор по научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---